

**Piezokeramischer Vielschichtaktor mit einem Übergangsbereich zwischen dem aktiven Bereich und den inaktiven Kopf- und Fußbereichen**

Die Erfindung betrifft einen piezokeramischen Vielschichtaktor entsprechend dem Oberbegriff des ersten Anspruchs.

5 Vielschichtaktoren aus piezokeramischen Werkstoffen weisen eine wechselseitige Kontaktierung auf, das heißt, die Innenelektroden werden alternierend an die Oberfläche der sich gegenüberliegenden Seiten des Aktors geführt und dort jeweils durch eine Aussenelektrode elektrisch parallel geschaltet. Zur elektrischen Isolierung bestehen der Kopfbereich und der

10 Fußbereich aus inaktiven, das heißt elektrodenfreien Lagen aus Piezokeramik.

Durch die Anordnung der metallischen Elektroden und der Lagen des piezokeramischen Werkstoffs wird die Schwindung des piezokeramischen Werkstoffs, insbesondere im passiven Kopf- und Fußbereich, während des Sinterprozesses beeinflusst. Schwindungsdifferenzen zwischen elektrodennahen

15 und elektodenfernen Bereichen führen zu Spannungen im keramischen Werkstoff, die entweder schon während des Sinterprozesses zu Rissen führen oder im fertigen Bauteil festigkeitsmindernd wirken. Dadurch vergrößert sich bei diesen Bauteilen die Anfälligkeit zur Rissbildung während des Betriebes deutlich. Unterschiedliche Dehnungsverhalten des aktiven und des passiven Bereichs

20 während des Betriebs führen insbesondere an der Grenze zwischen beiden Bereichen zu Spannungen, die die Rissbildung begünstigen. Risse können für einige Anwendungen toleriert werden. Es ergeben sich jedoch grundsätzliche Probleme. Wenn der Aktor nicht vollständig gekapselt ist, treten an den durch die Risse freigelegten Elektrodenenden elektrische Felder auf, die zur Anlagerung

25 von Wasser oder anderen polaren Molekülen führen können. Diese verursachen Leckströme oder führen zu einer verstärkten Degradation des Aktorverhaltens. Es ist außerdem nicht vollständig auszuschließen, dass die Aktoren, durch die Risse vorgeschädigt, aufgrund von Ausbrüchen während des Betriebs versagen.

Aufgabe der Erfindung ist es, die Ursachen für das Auftreten von rissbildenden Spannungen weitestgehend zu beseitigen.

Die Lösung der Aufgabe erfolgt mit Hilfe der kennzeichnenden Merkmale des ersten Anspruchs. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung werden in 5 den Unteransprüchen beansprucht.

Erfindungsgemäß ist jeweils zwischen dem aktiven Bereich und dem inaktiven Kopfbereich und Fußbereich ein Übergangsbereich zwischengeschaltet, dessen Schwindung während der Herstellung und dessen Dehnungsverhalten während des Betriebs zwischen der Schwindung beziehungsweise Dehnungsverhalten 10 des aktiven und der Schwindung beziehungsweise dem Dehnungsverhalten der piezoelektrisch inaktiven Bereiche liegt. Dieser Übergangsbereich kann durch zwei Maßnahmen geschaffen werden. Entweder wird im Übergangsbereich der Abstand zwischen den Innenelektroden zu den Enden des Aktors hin von Elektrode zu Elektrode vergrößert oder der Werkstoff des Übergangsbereichs 15 besteht aus einem piezokeramischen Werkstoff, dessen Schwindung und Dehnungsverhalten zwischen den Eigenschaften des aktiven und den Eigenschaften des passiven Bereichs liegt. Die Eigenschaften des Werkstoffs im Übergangsbereich, insbesondere sein Sinterverhalten, können durch eine Dotierung mit Fremdatomen beeinflusst werden. Dazu eignen sich die Werkstoffe 20 der Innenelektroden. Die Dotierung kann in einer Konzentration erfolgen, die sich im aktiven Bereich an der Grenze zwischen einer Innenelektrode und dem keramischen Werkstoff durch natürliche Diffusion einstellt. Eine Dotierung kann beispielsweise mit Silber erfolgen, das ein Werkstoff der Innenelektroden ist.

Durch die Vergrößerung der Abstände der Innenelektroden im Übergangsbereich 25 wird erfindungsgemäß bewirkt, dass bei der Herstellung eines Vielschichtaktors die unterschiedliche Schwindung zwischen dem aktiven und dem inaktiven Bereich nicht abrupt erfolgt und dadurch der Aufbau von Spannungen bis zur verursachenden Größe der Rissbildung vermieden wird. Während des Betriebs des Aktors wird beim Anlegen der Betriebsspannung die Feldstärke im

Übergangsbereich entsprechend der Vergrößerung des Elektrodenabstands stufenweise bis auf Null reduziert. Die durch die unterschiedliche Dehnung vom aktiven und dem sich anschließenden inaktiven Bereich ansonsten entstehenden Spannungen werden durch den Übergangsbereich auf ein deutlich größeres Bauteilvolumen verteilt. Dadurch wird verhindert, dass die Spannungen eine die Rissbildung auslösende kritische Größe erreichen. Die Vergrößerung der Abstände zwischen den Elektroden im Zwischenbereich kann dadurch erzeugt werden, dass zwischen den Elektroden in der dem gewünschten Abstand entsprechender Anzahl Folien aus piezokeramischem Werkstoff aufeinandergelegt werden, die nicht mit Elektroden bedruckt sind.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, im Übergangsbereich den Abstand von Innenelektrode zu Innenelektrode zu vergrößern. Der Abstand kann in Schritten der Folge der natürlichen Zahlen vergrößert sein. Beträgt der Abstand der Elektroden im aktiven Bereich beispielsweise 100 µm, was in der Regel der Dicke einer Schicht aus einem piezokeramischen Werkstoff mit der Schicht des metallischen Werkstoffs der Elektrode entspricht, so vergrößert sich der Abstand in dem Übergangsbereich in den Schritten 200 µm, 300 µm, 400 µm usw..

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung kann im Übergangsbereich der Abstand von Elektrode zu Elektrode auch in Schritten einer geometrischen Reihe vergrößert sein. Ebenfalls ausgehend von einem Abstand der Innenelektroden von 100 µm vergrößert sich der Abstand hier in den Schritten 200 µm, 400 µm, 800 µm usw..

Weiterhin kann im Übergangsbereich der Abstand der Innenelektroden in Schritten einer logarithmischen Skalierung erfolgen.

Anhand von Ausführungsbeispielen wird die Erfindung näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 einen erfindungsgemäßen Vielschichtaktor, dessen Übergangsbereich durch Vergrößerung des Abstands zwischen den Elektroden gebildet wird und

Figur 2 einen erfindungsgemäßen Vielschichtaktor, dessen Übergangsbereich durch einen piezokeramischen Werkstoff gebildet wird, dessen Schwindung und Dehnungsverhalten zwischen den Eigenschaften des aktiven und den Eigenschaften des passiven Bereichs liegt.

- 5 In Figur 1 ist ein erfindungsgemäßer piezokeramischer Vielschichtaktor 1 stark vergrößert schematisch dargestellt. Der Aktor weist eine wechselseitige Kontaktierung auf. Er ist als Monolith hergestellt worden, das heißt, er besteht aus gestapelten dünnen Schichten 2 piezoelektrisch aktiven Werkstoffs, beispielsweise Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), mit dazwischen angeordneten 10 leitfähigen Innenelektroden 3. Vor dem Sintern werden auf die piezoelektrisch aktiven Schichten 2, auf die sogenannten Grün-Folien, durch ein Siebdruckverfahren die Innenelektroden 3 aufgedruckt, die Folien 2 mit den Innenelektroden 3 zu einem Stapel verpresst, pyrolysiert und dann gesintert, wodurch ein monolithischer Vielschichtaktor 1 entsteht.
- 15 Die Innenelektroden 3 werden alternierend an die sich gegenüberliegenden Aktoroberflächen geführt, wo sie jeweils durch eine Außenelektrode 4, 5 miteinander verbunden werden. Dadurch werden die Innenelektroden 3 jeweils auf einer Seite des Aktors 1 elektrisch parallel geschaltet und so zu einer Gruppe zusammengefasst. Die Außenelektroden 4, 5 sind die Anschlusspole des Aktors.
- 20 Wird über die Anschlüsse 6 eine elektrische Spannung an die Anschlusspole gelegt, so wird diese auf alle Innenelektroden 3 parallel übertragen und verursacht ein elektrisches Feld in allen Schichten 2 des aktiven Materials, das sich dadurch mechanisch verformt. Die Summe aller dieser mechanischen Verformungen steht an den Endflächen des Aktors 1 als nutzbare Dehnung 7 25 und/oder Kraft zur Verfügung.

Ein herkömmlicher Vielschichtaktor besteht aus dem inaktiven Kopfbereich 8 und dem inaktiven Fußbereich 9, in denen keine Innenelektroden angeordnet sind, und dem aktiven Bereich 10 mit den Innenelektroden 3. Bei dem erfindungsgemäßen Vielschichtaktor 1 ist jeweils zwischen dem elektrodenfreien

Kopfbereich 8 sowie dem elektrodenfreien Fußbereich 9 und dem aktiven Bereich 10 ein Übergangsbereich 11 angeordnet. Während der Abstand 12 der Innenelektroden 3 im aktiven Bereich 10 konstant gleich groß ist, vergrößert er sich innerhalb der Übergangsbereiche 11 von Elektrode zu Elektrode zum

5 Kopfbereich 8 beziehungsweise Fußbereich 9 hin. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel vergrößern sich die Abstände, ausgehend vom Abstand 12 der Innenelektroden 3 im aktiven Bereich 10, in Schritten der Folge natürlicher Zahlen. Der Abstand 13 entspricht noch dem Abstand 12 im aktiven Bereich 10 und damit der Dicke einer Folie oder Schicht 2 piezoelektrisch aktiven Werkstoffs

10 im gesinterten Zustand. Der Abstand 14 ist doppelt so groß wie der Abstand 13 oder der Abstand 12, der Abstand 15 ist um das Dreifache, der Abstand 16 um das Vierfache und der Abstand 17 um das Fünffache größer als der Abstand 13. Die Abstandsvergrößerung kann dadurch erzielt werden, dass entsprechend der Abstandsvergrößerung eine darauf abgestimmte Anzahl von Lagen 2

15 aufeinandergelegt wird.

Das Ausführungsbeispiel nach Figur 2 unterscheidet sich von dem Ausführungsbeispiel nach Figur 1 nur durch den Übergangsbereich, hier mit 18 bezeichnet. Mit dem vorhergehenden Ausführungsbeispiel übereinstimmende Merkmale sind mit denselben Bezugsziffern bezeichnet. Der Übergangsbereich 20 18 besteht aus einem piezokeramischen Werkstoff, dessen Schwindung und Dehnungsverhalten zwischen den Eigenschaften des aktiven und den Eigenschaften des passiven Bereichs liegt. Er ist beispielsweise mit Silber, einem Werkstoff der Innenelektroden, in einer Konzentration dotiert, die sich im aktiven Bereich an der Grenze zwischen einer Innenelektrode und dem keramischen 25 Werkstoff durch natürliche Diffusion einstellt.

### Patentansprüche

1. Piezokeramischer Vielschichtaktor (1) mit alternierend an die Aktoroberfläche geführten Innenelektroden (3), wobei die gleich gepolten Innenelektroden (3) des aktiven Bereichs (10) zur Parallelschaltung an die jeweilige 5 Aussenelektrode (4, 5) angeschlossen sind, die Aussenelektroden (4, 5) auf sich gegenüberliegenden Seiten des Aktors (1) angeordnet sind und der Kopfbereich (8) und der Fußbereich (9) piezoelektrisch inaktiv sind, dadurch gekennzeichnet, dass sich an den aktiven Bereich (10) jeweils zum inaktiven 10 Kopfbereich (8) und inaktiven Fußbereich (9) hin ein Übergangsbereich (11, 18) anschließt, dessen Schwindung und dessen Dehnverhalten zwischen der Schwindung und dem Dehnverhalten des aktiven (10) und der Schwindung und dem Dehnverhalten eines inaktiven Bereichs (8, 9) liegt und der frei von Elektroden ist.
2. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, dadurch 15 gekennzeichnet; dass im Übergangsbereich (11) zwischen dem aktiven Bereich (10) und dem inaktiven Kopfbereich (8) und dem inaktiven Fußbereich (9) der Abstand (12, 13, 14, 15, 16, 17) zwischen den Innenelektroden (3) zum Kopf- (8) oder Fußbereich (9) des Aktors (1) hin von Elektrode zu Elektrode vergrößert ist.
3. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch 20 gekennzeichnet, dass die Vergrößerung des Abstands (12, 13, 14, 15, 16, 17) der Innenelektroden (3) im Übergangsbereich (11) zum Kopf- (8) oder Fußbereich (9) des Aktors (1) hin, ausgehend vom Abstand (12) der Innenelektroden (3) im aktiven Bereich (10), in Schritten der Folge der 25 natürlichen Zahlen erfolgt.
4. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Vergrößerung des Abstands der Innenelektroden (3) im Übergangsbereich (11) zum Kopf- (8) oder Fußbereich (9) des Aktors

(1) hin, ausgehend vom Abstand (12) der Innenelektroden (3) im aktiven Bereich (10), in Schritten einer geometrischen Reihe erfolgt.

5. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Vergrößerung des Abstands der Innenelektroden (3) im Übergangsbereich (11) zum Kopf- (8) oder Fußbereich (9) des Aktors (1) hin, ausgehend vom Abstand (12) der Innenelektroden (3) im aktiven Bereich (10), in Schritten einer logarithmischen Skalierung erfolgt.

10. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Anzahl der Schritte zur Vergrößerung des Abstands (12, 13, 14, 15, 16, 17) zwischen den Elektroden (3) dem Unterschied der Schwindung und des Dehnverhaltens zwischen dem aktiven (10) und dem angrenzenden passiven Bereich (8, 9) angepasst ist.

15. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der größte Abstand (17) zwischen den beiden letzten Elektroden (3) im Übergangsbereich (11) bis zu 2 mm beträgt.

20. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der größte Abstand (17) zwischen den beiden letzten Elektroden (3) im Übergangsbereich (11) etwa zwischen 0,1 mm und 1 mm liegt.

25. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der jeweilige Übergangsbereich (18) zwischen dem inaktiven Kopfbereich (8) und dem inaktiven Fußbereich (9) aus einem modifizierten piezokeramischen Werkstoff besteht, dessen Schwindung und dessen Dehnverhalten zwischen der Schwindung und dem Dehnverhalten des aktiven Bereichs (10) liegt:

10. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Eigenschaften des Werkstoffs im Übergangsbereich (11), insbesondere sein Sinterverhalten, durch eine Dotierung mit Fremdatomen der Werkstoffe der Innenelektroden (3) beeinflussbar sind.
11. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Dotierung des Werkstoffs im Übergangsbereich (11) in einer Konzentration besteht, die sich im aktiven Bereich (10) an der Grenze zwischen einer Innenelektrode (3) und dem keramischen Werkstoff (2) durch natürliche Diffusion einstellt.
10. 12. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Dotierung des Werkstoffs im Übergangsbereich (11) mit Silber erfolgt ist.

### Zusammenfassung

Bei piezokeramischen Vielschichttoren bestehen der Kopfbereich und der Fußbereich aus inaktiven, das heißt elektrodenfreien Lagen aus Piezokeramik. Durch die Anordnung der metallischen Elektroden und der Lagen des piezokeramischen Werkstoffs wird die Schwindung des piezokeramischen Werkstoffes, insbesondere im passiven Kopf- und Fußbereich, während des Sinterprozesses beeinflusst und kann Rissbildungen verursachen. Auch unterschiedliche Dehnungsverhalten des aktiven und des passiven Bereichs während des Betriebs führen insbesondere an der Grenze zwischen beiden Bereichen zu Spannungen, die die Rissbildung begünstigen.

Erfindungsgemäß wird deshalb vorgeschlagen, dass sich an dem aktiven Bereich (10) jeweils zum inaktiven Kopfbereich (8) und inaktiven Fußbereich (9) hin ein Übergangsbereich (11) anschließt, dessen Schwindung und dessen Dehnverhalten zwischen der Schwindung und dem Dehnverhalten des aktiven (10) und der Schwindung und dem Dehnverhalten eines inaktiven Bereichs (8, 9) liegt und der frei von Elektroden ist.

(Figur 1)